

등가감속 프로파일을 이용한 EOTS 위치제어

EOTS Position Control Using Constant Acceleration and Deceleration Profile

임정빈* 유준**
Jong-Bin Yim Lyou Joon

Abstract

Electro Optical Tracking System(EOTS) is required for a rapid movement as well as the stabilization of Line-Of-Sight(LOS). In order to achieve these two goals, this paper presents a position and velocity driving profile generation method from the constant acceleration and deceleration profile according to the current state, enabling a fast and smooth trajectory even if the target position changes during the movement of LOS. Simulation and experimental results reveal that the settling time could be reduced significantly by adopting the present position control scheme.

Keywords : EOTS(전자광학 추적장비), LOS(시선), Stabilization(안정화), Minimum-time(최단 시간), Constant Acceleration and Deceleration Profile(등가감속 프로파일)

1. 서론

전자광학 추적장비(EOTS : Electro-Optical Tracking System)는 영상 신호를 이용하여 이동하는 목표물을 자동적으로 추적하면서 관측자에게 목표물에 대한 안정화된 영상을 제공하고 표적의 속도, 각속도 등의 표적정보를 사격통제 시스템에 제공하는 장치이다.

EOTS는 특수목적 항행, 관측 및 정찰을 위해 특정 지정위치에 시선을 고정시키는 위치제어기능을 갖는다. 이를 위해 탑재된 플랫폼의 움직임 및 외란을 실시간 보상하여 정확하고 안정되게 지향하는 최소오차

위치제어가 이루어져야 한다. 동시에 관측이 필요한 지점의 변경시에 다른 시선위치로 최단시간 위치제어가 이루어져야 한다. 결국 최단시간 위치제어와 최소오차 위치제어라는 이중의 목적이 요구된다^{1,2)}.

이와 같이 상충되는 두 가지 목적을 만족시키기 위해 Mode Switching, Fuzzy 제어방식 등이 연구되어 왔다. 모드 스위칭 제어는 최단시간 위치제어기와 최소오차 위치제어기를 각각 설계하고 위치오차 또는 운용모드에 맞추어 스위칭하는 구조로, 스위칭시 과도응답의 개선이 요구된다. 퍼지 제어의 경우, 전문가의 경험과 지식이 필요하며, 다수의 설계점에 따른 제어 규칙의 설계에 비용과 노력이 많이 들기에 실제 적용이 많지 않은 편이다^{3,4)}.

본 논문에서 최소오차 위치제어를 위해서는 튜닝값에 따라 정밀한 제어가 가능한 PID 제어를 사용하고, 최단시간 위치제어를 위해서는 매순간 가감속을 결정

† 2012년 10월 2일 접수~2012년 12월 14일 게재승인

* 삼성탈레스(주)

** 충남대학교

책임저자 : 유 준(jlyou@cnu.ac.kr)

하는 구동 프로파일을 적용하였다. 기존의 목표지점에 따라 결정되는 정해진 패턴의 가감속 제어방식^{5~7}과는 달리 매순간 가속 또는 감속을 판단하여 정해진 등가감속 프로파일로부터 위치 및 속도 구동 프로파일을 생성함으로써 시선 이동중 목표위치가 변경되더라도 정지하지 않고 그대로 진행함에 따라 속응성을 높일 수 있다. 실험 결과를 통해 위치 및 속도 프로파일을 모두 이용함으로써 오버슈트 없이 위치제어가 이루어짐을 확인하였다. 실시간으로 계산이 가능하도록 하였으며, 실장비 시험을 통해 성능을 검증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 현 위치 제어 시스템 구조를 설명하고, 개선점을 제시하였다. 3장에서 가감속 구동 프로파일을 이용한 위치제어기 구조를 제안하고 전자광학 추적장비를 위한 위치/속도 프로파일을 설계하였다. 특별히 목표위치가 수시로 바뀌는 전자광학 추적장비의 위치제어를 위해 실시간으로 목표위치에 대한 위치/속도 프로파일이 생성되도록 하였다. 4장에서 실장비 시험결과를 통해 제안한 기법의 효과를 검증하였다. 결론에서 주요 결과를 요약하고 기대효과를 언급한다.

2. 현 위치제어 시스템 구조

현재 장비에 설치된 위치제어기의 구조는 Fig. 1과 같다. 최단시간 위치제어기와 최소오차 위치제어기를 각각 설계하고, 위치오차 또는 운용 모드에 맞추어 스위칭하는 구조이다. 계단 위치명령이 인가되면, 최단시간 위치제어기에서 최대 속도명령이 안정화 제어기에 인가된다. 위치오차가 규정치 이하가 되면, 최소오차 위치제어기로 스위칭된다. 하지만 이 경우 스위칭에 의해 과도적으로 시스템의 입력과 출력에 오버슈트가 발생하게 된다. 이를 방지하기 위해 모드 스위칭시 최소오차 위치제어기의 적분기 상태를 최단시간 위치제어기내 적분기 초기값으로 대체한다. 하지만, 이런 초기치 완충에도 불구하고 장비의 가감속이 빠른 경우 여전히 오버슈트가 발생하고 있다.

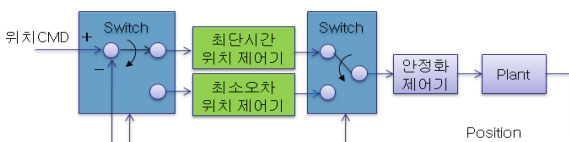


Fig. 1. The Conventional Position Controller

3. 제안된 위치제어 방식

가. 변경된 구조

위치제어 초기의 과도상태에는 최단시간 위치제어를 통해 빠른 시간에 위치오차를 줄이고, 위치제어 후의 안정화 시기에는 외란보상과 함께 지정된 위치에 최소 오차로 시선을 고정시키는 제어기법이 요구된다. 이를 위해 본 논문에서는 Fig. 2와 같이 구동 프로파일을 이용한 위치제어기를 제시한다.

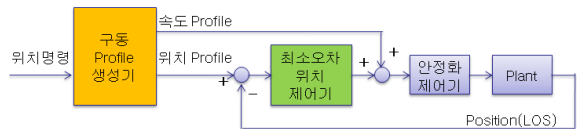


Fig. 2. The Present Position Controller

안정화 제어기는 자이로스코프를 통해 외란을 측정하고, 이를 보상하여 시선을 관성좌표계에 고정시킨다. 최소오차 위치제어기는 PID 제어기를 사용하며, 작은 위치오차도 빠르게 보상할 수 있도록 큰 이득을 갖도록 한다. 구동 프로파일 생성기는 계단 형태의 위치명령을 플랜트의 가속도 및 속도 최대치를 고려하여 부드러운 곡선형태의 위치명령으로 변환하며, 최소오차 위치제어기에 작은 위치오차가 입력되도록 한다. 이때, 플랜트의 최대 가속도 및 최대 속도를 이용함으로써, 최단시간 위치제어가 가능하도록 한다. 위치명령(목표 위치)에 도달한 경우, 가감속 구동 프로파일을 생성하지 않으며, 최소오차 위치제어만 수행한다.

나. 전자광학 추적장비를 위한 위치/속도 프로파일

구동프로파일은 해당 장비의 특성에 따라 다른 형태를 적용할 수 있다⁸. Fig. 3은 사다리꼴 형상의 구동프로파일이다. 동일한 속도와 가속도 제한상황에서 사다리꼴 형상의 구동프로파일이 같은 시간에 더 먼 거리를 이동할 수 있다. 즉, 최단시간 위치구동이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 최단구동시간의 이점이 있는 사다리꼴 형상의 구동프로파일을 선택하였다.

전자광학 추적장비의 구동을 등가속도 운동으로 가정하면 식 (1)에서 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$P = P_0 + V_0 t + \frac{1}{2} A t^2 \quad (1)$$

$$V = V_0 + A t \quad (2)$$

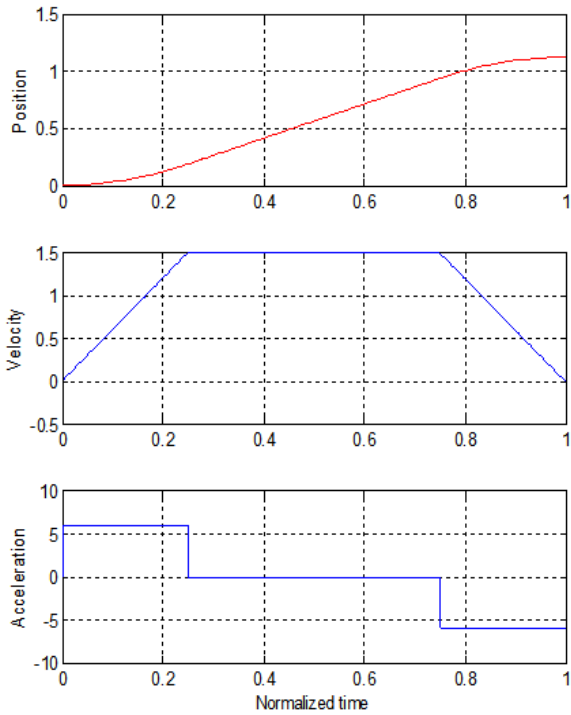


Fig. 3. Trapezoidal Profile

$$2AP = V^2 - V_0^2 \quad (3)$$

전자광학 추적장비의 경우 위치명령이 제어모드에 따라 수시로 바뀌며, 위치제어가 수행되는 중에도 위치명령이 바뀔 수 있으므로 초기속도가 '0'이라는 가정을 사용할 수 없다. 따라서 본 논문에서 매순간 구동프로파일을 새롭게 갱신하여 연속적인 위치/속도 구동 프로파일이 생성되도록 하는 가감속 구동프로파일 생성기법을 제안한다. Fig. 4는 본 방식의 흐름도이다.

매순간 위치명령(P_{cmd})과 정지위치(P_{stop})를 비교하면, 현재 시점에서 장비의 가속 또는 감속을 판단할 수 있다. 정지위치(P_{stop})는 식 (4)를 통해 구할 수 있다.

$$P_{stop} = \text{sgn}(V_k) \times \frac{V_k^2}{2A_{max}} + P_k \quad (4)$$

이때, P_k 는 현재위치 V_k 는 현재속도이며, A_{max} 는 최대 가속도이다.

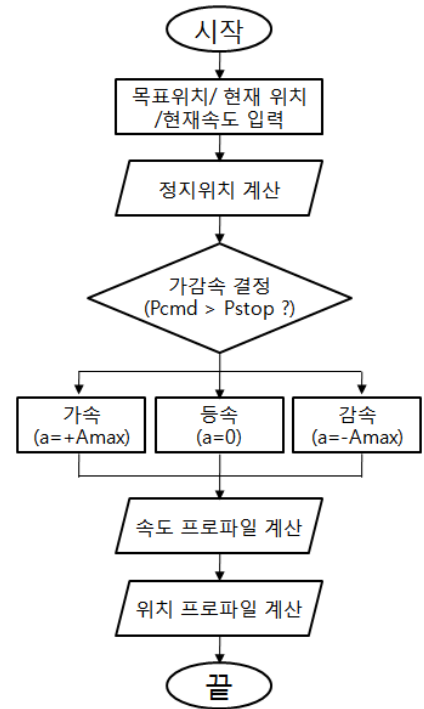


Fig. 4. Flowchart of the Present Scheme

Fig. 5는 위치명령과 정지위치에 대한 관계를 나타낸 것이다. 위치명령(P_{cmd})과 정지위치(P_{stop})를 비교하여 현재시점에서 장비의 가속/등속/감속을 결정한다.

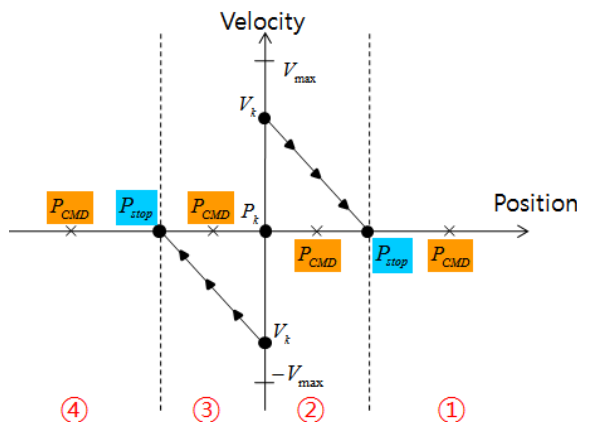


Fig. 5. Relationship between Stop Position and Position Command

현재속도가 $V_k \geq 0$ 인 경우를 가정하면 식 (5-1)과

같다. 이때 A_{max} 는 최대 가속도이며, V_{max} 는 최대 속도이다.

$$a = \begin{cases} A_{max} & (P_{cmd} > P_{stop}) & \text{--- ①} \\ -A_{max} & (P_{cmd} \leq P_{stop}) & \text{--- ②} \end{cases} \quad (5-1)$$

(단, $V_k \geq V_{max}$ 일 경우 $a = 0$)

$V_k < 0$ 인 경우를 가정하면 식 (5-2)와 같다.

$$a = \begin{cases} A_{max} & (P_{cmd} \geq P_{stop}) & \text{--- ③} \\ -A_{max} & (P_{cmd} < P_{stop}) & \text{--- ④} \end{cases} \quad (5-2)$$

(단, $V_k < -V_{max}$ 일 경우 $a = 0$)

식 (5-1)과 (5-2)를 통해 가속도가 결정되면 이를 이용하여 식 (6), (7)과 같이 현재시점에서의 속도명령 및 위치명령을 구할 수 있다.

$$V_{k+1} = V_k + aT_s \quad (6)$$

$$P_{k+1} = P_k + V_k T_s + \frac{1}{2} a T_s^2 \quad (7)$$

이때 T_s 는 샘플링 시간이며, a 는 가속도이다.

Fig. 6과 7은 본 논문에서 제안한 실시간 구동프로파일을 시뮬레이션한 결과이다. Fig. 6은 약 5Hz로 변경되는 위치명령에 대한 위치 프로파일의 변화를 나타낸 것이며, Fig. 7은 이에 따른 속도 프로파일의 변화를 나타낸 것이다.

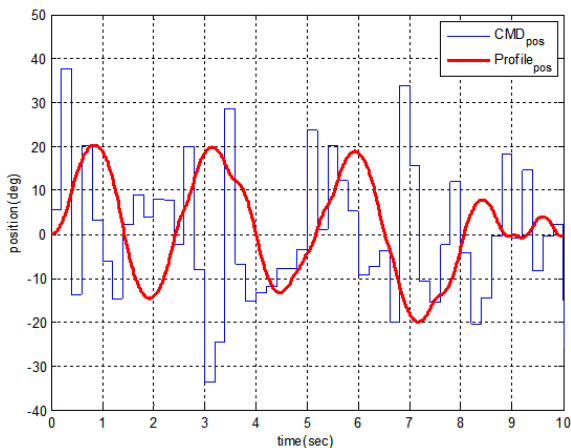


Fig. 6. Position Command Profile

Fig. 6과 7에서 위치명령의 빈번한 변화에도 연속적인 위치구동 명령이 생성되며 속도 프로파일에서 보듯이 등가가속이 원활하게 이루어짐을 확인할 수 있다.

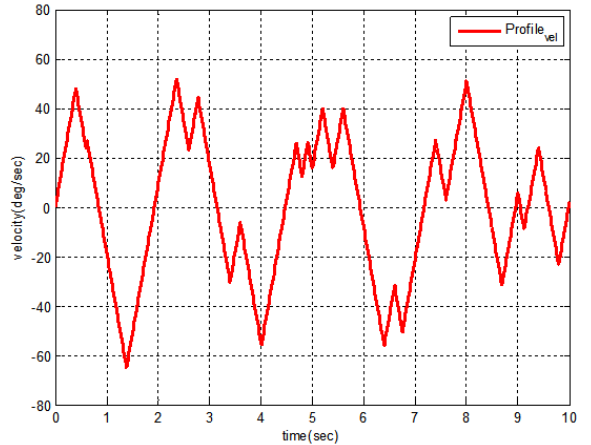


Fig. 7. Velocity Command Profile

4. 실장비 시험 결과 및 비교

Fig. 8은 실장비에서 기존의 위치제어기를 시험한 결과이다. 약 2.2초에 90도의 위치명령을 주어 최단시간 위치제어가 이루어졌고, 약 4초에 모드 스위칭이 되어 최소오차 위치제어가 수행되었다. 정상상태에 이르는 시간이 약 4초 소요되었으며, 오버슈트는 약 1.5도 발생하였다.

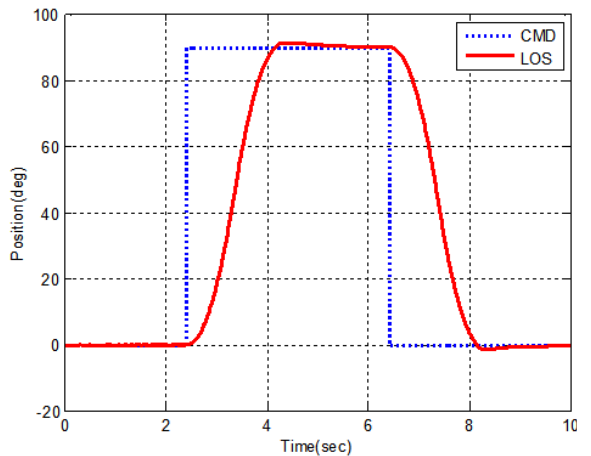


Fig. 8. Position Control Test Result(previous)

Fig. 9에서 13은 실장비를 이용하여 본 논문에서 제안한 가감속 프로파일을 이용한 제어방법을 시험한 결과이다.

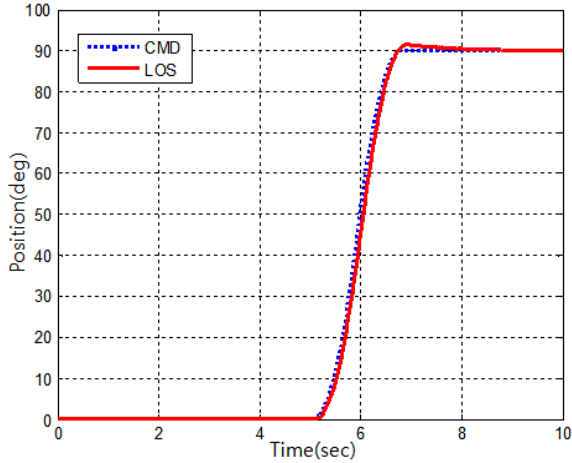


Fig. 9. Position Control Test Result(Position Profile)

Fig. 9는 위치 프로파일 명령만을 적용한 결과이며, Fig. 10은 시선 오차를 나타낸 것이다. 감속이 시작되는 시점에 가장 큰 위치오차를 나타내었으며, 오버슈트는 약 1.3도 발생하였다.

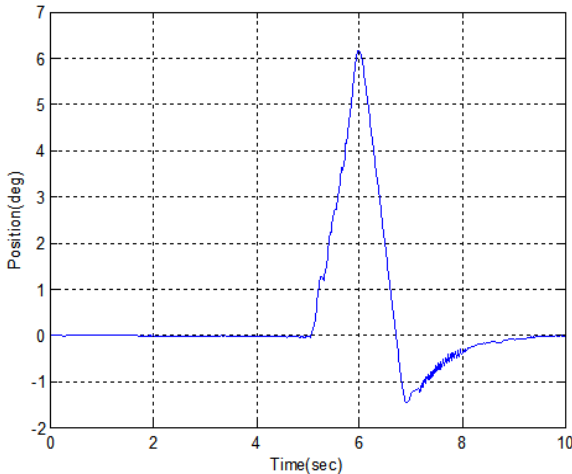


Fig. 10. Position Error Test Result(Position Profile)

Fig. 11은 위치와 속도 프로파일 명령을 함께 적용한 결과이다. 속도 프로파일 명령을 피드포워드(feedforward) 형태로 안정화 제어기에 인가하였다.

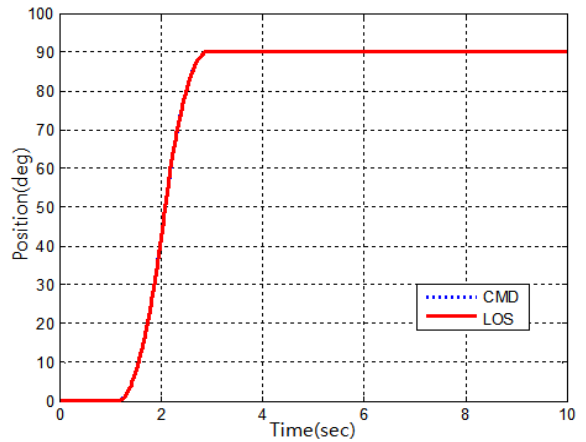


Fig. 11. Position Control Test Result(Position/Velocity Profile)

Fig. 12는 이 때 시선의 위치오차를 나타낸 것이다. 감속이 시작되는 시점에서도 약 0.15 이하로 위치제어가 잘 이루어졌고, 오버슈트가 거의 발생하지 않았다. 정착시간은 약 2초이다. 또한 가감속 제어가 완료된 이후에는 최소 위치제어를 통해 정확하고 안정되게 지향됨을 확인하였다.

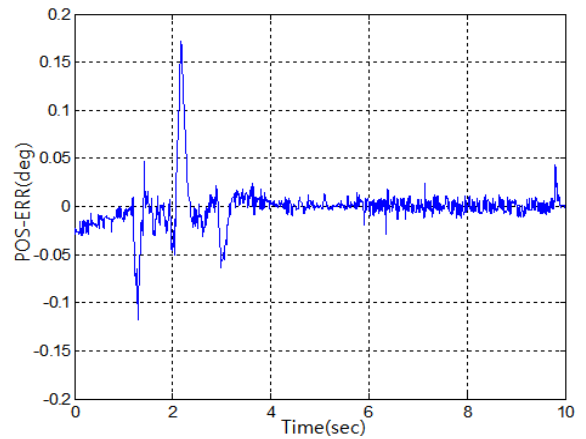


Fig. 12. Position Error Test Result(Position/Velocity Profile)

Fig. 13은 90도의 위치명령에 대한 기존의 모드스위칭 제어방식과 제안한 가감속 프로파일 방식의 제어 성능을 비교한 것이다. 오버슈트가 약 1/10(1.5도 → 0.15)로 감쇄하였고, 이에 따라 정착시간 또한 절반(4초 → 2초)으로 감소하였다.

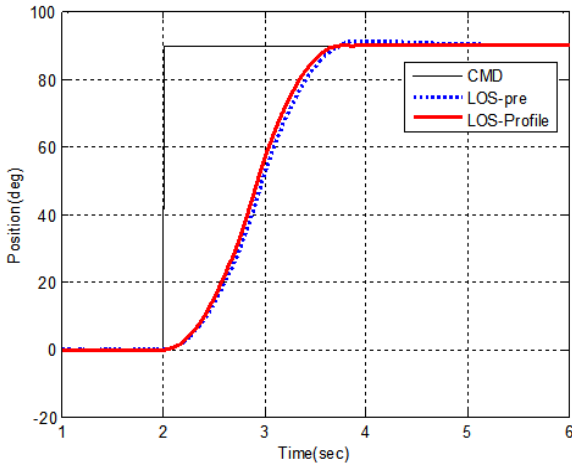


Fig. 13. Performance Evaluation and Comparison

5. 결론

전자광학 추적장비의 최단시간 위치제어와 최소오차 위치제어의 이중의 목적을 동시에 달성하기 위해 본 연구에서는 가감속 프로파일을 이용한 최단시간 및 최소오차 위치제어기를 제안하였다. 현재의 위치 및 속도, 목표위치를 이용하여 매순간 가속 또는 감속을 결정하고, 이로부터 위치 및 속도 명령을 생성함으로써 이동중 목표위치의 변경에 실시간으로 대응하였다.

시뮬레이션 결과를 통해 위치명령이 수시로 변경되더라도 안정적인 가감속 구동프로파일이 생성됨을 확인하였고, 이를 실장비에 탑재한 적용 시험을 통해 기존의 모드스위칭 방식에 비해 오버슈트 없이 최단시간 위치제어가 이루어짐을 확인하였다.

본 최단시간 위치제어 방식은 유사한 구조의 다른 시스템에도 곧바로 적용 가능하리라 사료된다.

References

- [1] 김성수, 신용산 외, “헬기 장착 전방관측적외선장비 좌표지향 성능 분석”, 한국군사과학기술학회 종합학술대회, pp. 486~489, 8. 2008.
- [2] 성기준, 박주광 외, “외란 관측기를 이용한 2축 안정화 시스템의 제어에 대한 연구”, 한국항공우주학회, 한국항공우주학회 학술발표회 논문집, pp. 805~808, 11. 2009.
- [3] Y. Peng, D. Vrancic, and R. Hanus, “Anti-windup, Bumpless, and Conditioned Transfer Techniques for PID Controller”, IEEE. Control Systems Magazine, Vol. 16, No. 4, pp. 48~57, 1996.
- [4] 서삼준, 김동원 외, “채터링 감소를 위한 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어기의 설계”, 퍼지 및 지능시스템학회 논문지, Vol. 14, No. 6, pp. 752~758, 10. 2004.
- [5] Huaizhong Li, “Motion Profile Design to Reduce Residual Vibration of High-Speed Positioning Stages”, Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, Vol. 14, Issue. 2, pp. 264~269, 2009.
- [6] K. H. Rew, K. S. Kim, “Using Asymmetric S-curve Profile for Fast and Vibrationless Motion”, Control, Automation and Systems, 2007. ICCAS '07. International Conference on, pp. 500~504, 2007.
- [7] R. V. Fleisig, A. D. Spence, “A Constant Feed and Reduced Angular Acceleration Interpolation Algorithm for Multi-axis Machining”, Computer-Aided Design, Vol. 33, No. 1, pp. 1~15, 1. 2001.
- [8] 김정환, “DSP로 리니어 모터 제어하기”, 동일출판사, 2003.